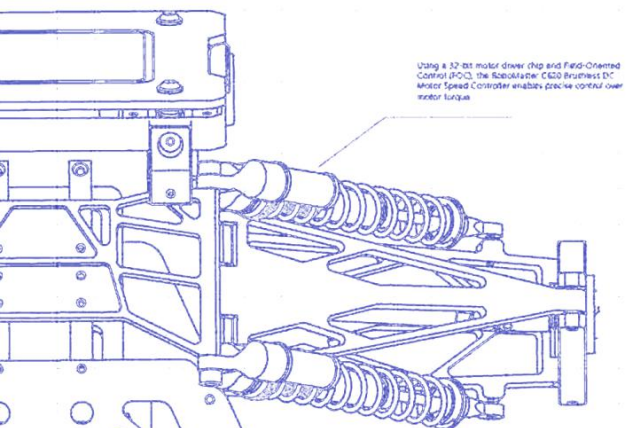
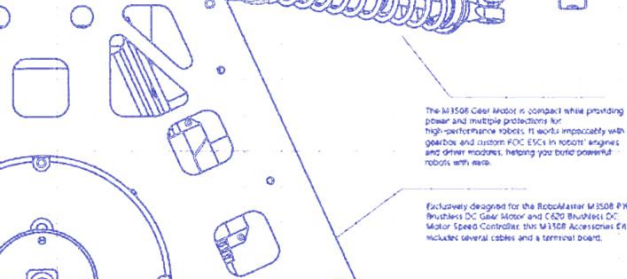


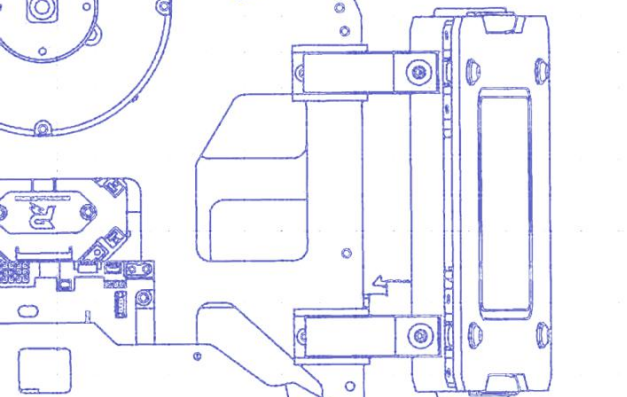
南京航空航天大学
NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS



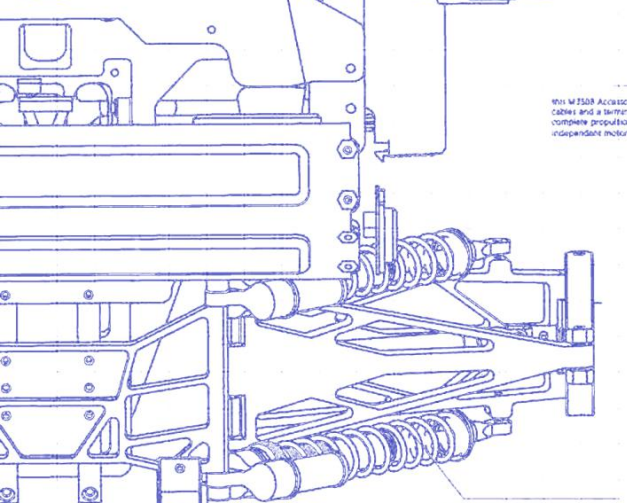
Using a 32-bit motor driver chip and Field-Oriented Control (FOC), the RobotMaster C420 Brushless DC Motor Speed Controller enables precise control over motor torque.



The M1508 Gear Motor is compact while providing power and multiple protections for high-performance robots. It works impeccably with a gearbox and custom FOC ESCs for robots' engines and driver modules, helping you build powerful robots with ease.



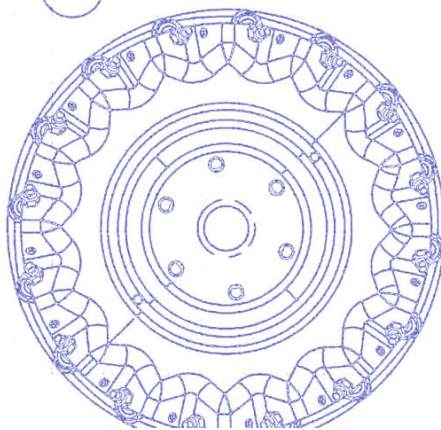
Exclusively designed for the RobotMaster M1508 FOC Brushless DC Gear Motor and C420 Brushless DC Motor Speed Controller, this M1508 Accessories Kit includes several cables and a terminal board.



This M1508 Accessories Kit includes several cables and a terminal board, creating a complete propulsion system driven by four independent motors.



Refer to System Specification Manual, Reference System User Manual, Introduction of Reference System Module.



技术文档

目录

1. 机器人概述.....	1
1.1 主要思路.....	1
1.2 实现的技术方案.....	1
1.3 战场战术定位.....	2
2. 机器人主要技术参数.....	3
2.1 基本参数.....	3
2.2 传感器.....	4
2.3 执行器件.....	4
3. 机器人机械分析.....	5
3.1 机器人机械部分设计.....	5
3.2 工艺选择.....	11
3.3 安装及连接.....	12
3.4 分析.....	13
4. 机器人电路设计.....	15
5. 机器人嵌入式控制.....	16
5.1 嵌入式程序功能介绍.....	16
5.2 嵌入式算法说明.....	16
5.3 代码设计介绍.....	17
6. 机器人算法.....	18
6.1 算法说明.....	18
6.2 MiniPC 与单片机的通信方式.....	19
7. 人机交互性设计.....	21
7.1 自定义UI 界面.....	21
7.2 防误操作设计.....	21
7.3 自动化的优化.....	23
8. 调试.....	24
8.1 调试过程说明.....	24
8.2 测试.....	24
9. 创新设计.....	27
10. 参考文献.....	28
11. 附录.....	29

1. 机器人概述

1.1 主要思路

步兵机器人设计重点为高机动性高与轻量化：保证稳定性的前提下缩减尺寸；采用轻量化材料减轻重量。

步兵机器人的主要设计指标如下表：

步兵机器人技术指标		
重量	设计要求 17kg 内（不含裁判系统）	
尺寸	设计要求 600*600*500 内	
移动	最大前进速度	4m/s
	上坡	$>20^\circ$
云台	Pitch 轴俯仰角	$-25^\circ \sim 25^\circ$
	Yaw 轴旋转速度	1.5r/s
射击	最大射速	30m/s
	命中率	5m 小装甲命中率 $\geq 95\%$
供弹	弹舱	容量 ≥ 300 发
	射频	500 发/分
自瞄	高帧率识别，运动预测，重力补偿	
保护框	能承受两辆步兵最大速度正面对撞	
外壳	对整车的电路和线材进行有效保护	

1.2 实现的技术方案

步兵机器人技术特点	
轻量化设计	底盘云台设计均贯彻了轻量化思想，整车重量较之前大幅下降，提升了机动性，同时降低了控制难度；
无枪管云台	根据官方开源指导使用无枪管发射机构，历经数次改进获得了较为优异的弹道，静止状态下 5m 小装甲命中率可做到 98%；小陀螺状态下射击 5m 小装甲命中率可达 95% 以上；
自适应悬挂	设计使用了自适应悬挂系统，通过杆组变换构造了非独立悬挂系统，在坡道遍布的复杂场地仍有良好的机动性；

超级电容	恒功率充电模块可保证整车功率始终为一定值，同时根据裁判系统缓冲功率值限制 3508 电流，保证检录电机堵转时功率仍然不超；
裁判系统交互	读取裁判系统发送的功率、等级等信息，动态调整弹速、射频，最大限度发挥车辆性能。利用车间通信自定义 UI，显示自瞄状态、电容信息等，并绘制了标尺，辅助瞄准；
云台	云台架没有直连 GM6020 电机，避免出现“断头”的情况；
外壳	车体外壳有效保护线材，避免模块离线。

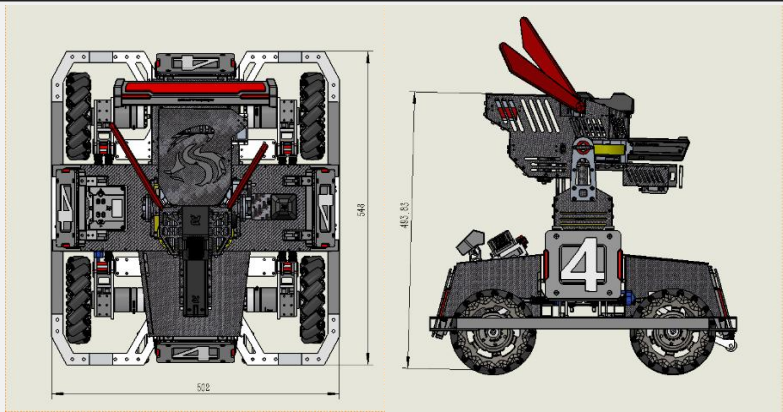

1.3 战场战术定位

步兵机器人的战术定位为高机动性战车。

在新加入经济体系后，英雄机器人的对拼能力受到了一定的限制，更像是一个攻城机器，相对来说本赛季的更多交火都将会发生在敌我的步兵机器人之间。作为地面单位中最重要的火力输出单位，步兵机器人需要协助工程机器人抢夺公共资源；与敌方步兵作战；掩护英雄机器人进攻敌方前哨战、基地；打击敌哨兵；同时还需防守我方前哨战与基地。这些对步兵机器人的射击精准性与机动性都提出了更高的要求。

2. 机器人主要技术参数

2.1 基本参数

参数		图示
重量	17.2kg	
长宽高	548*502*494	
重心高度	213	
云台与车体、夹爪的自由度	云台为 360° 云台，自由度为 2	
云台与车体、夹爪的相对位置	云台位于车体正中央	
电路功耗	2.3W	

电容	总容量 1800 焦耳 工作时电压范围 18V—25V	
----	--------------------------------	--

2.2 传感器

传感器种类及个数

种类	个数	用途
深度相机	1	自瞄视觉识别

2.3 执行器件

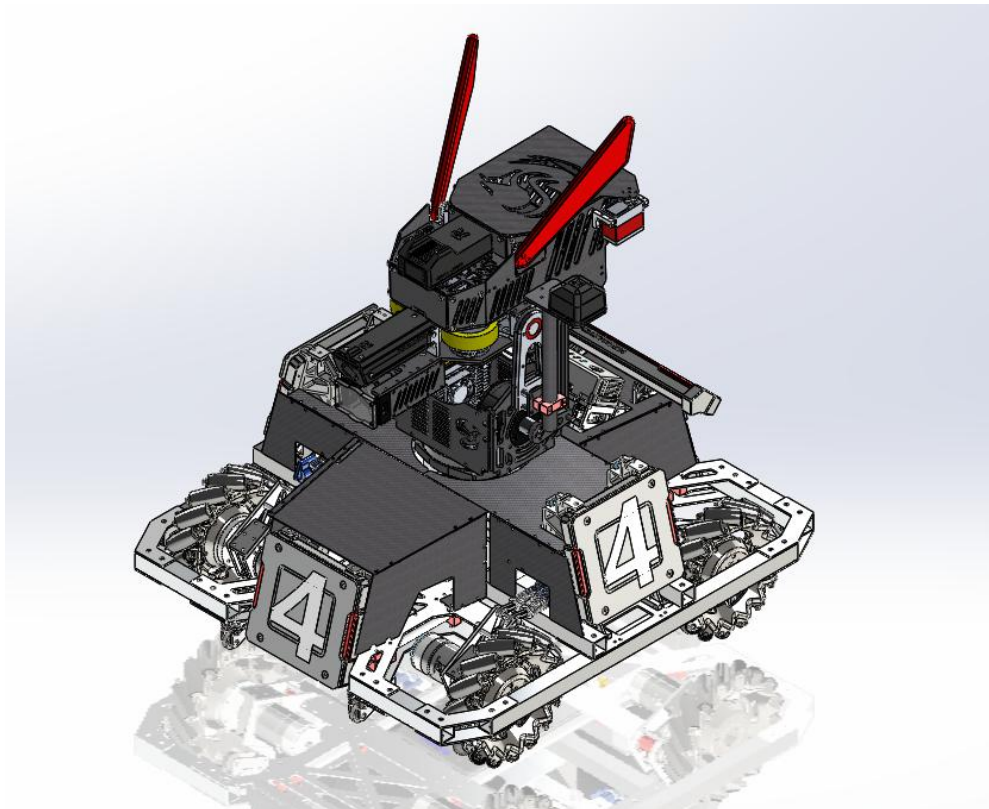
机器人执行器件（电机、气缸等）用途与数量说明（如上两条列表格展示）

种类	个数	用途
M3508	4	底盘动力输出
M3508（去掉减速箱）	2	摩擦轮动力输出
M2006	1	拨弹盘动力输出
GM6020	2	分别为云台 yaw 轴与 pitch 轴动力输出

3. 机器人机械分析

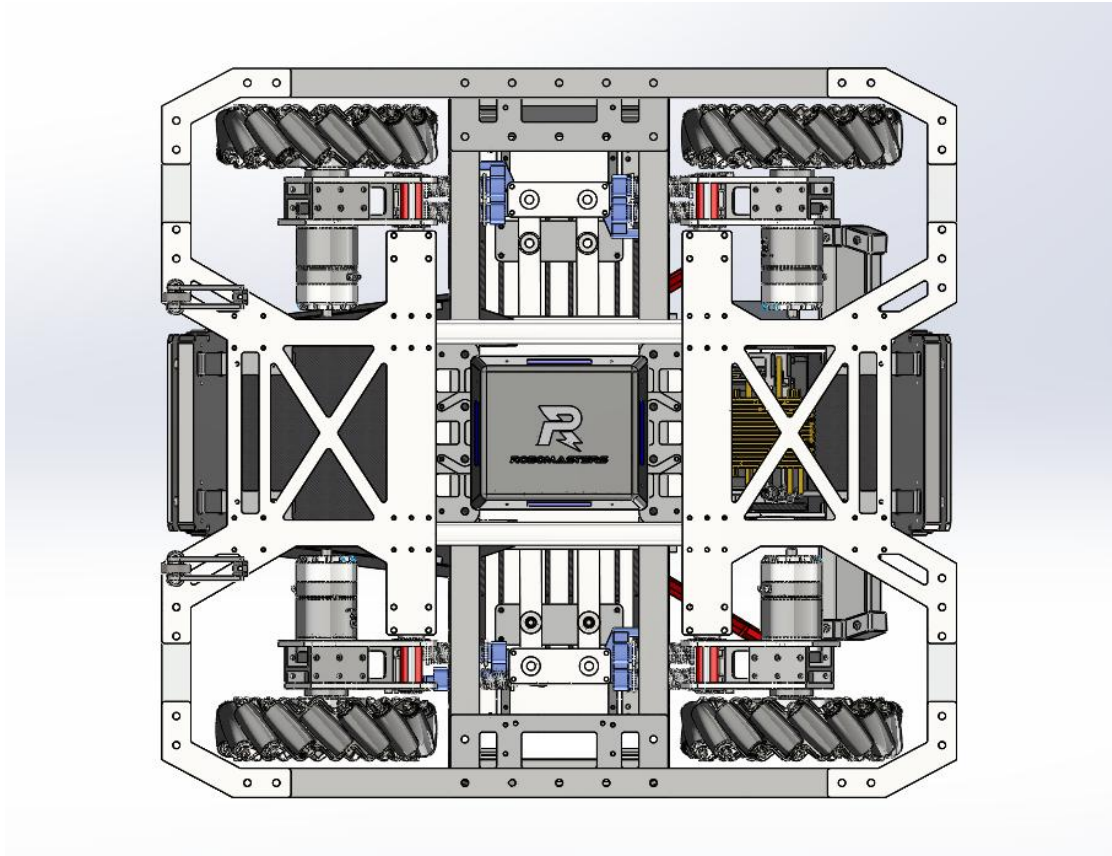
3.1 机器人机械部分设计

3.1.1 步兵整体方案



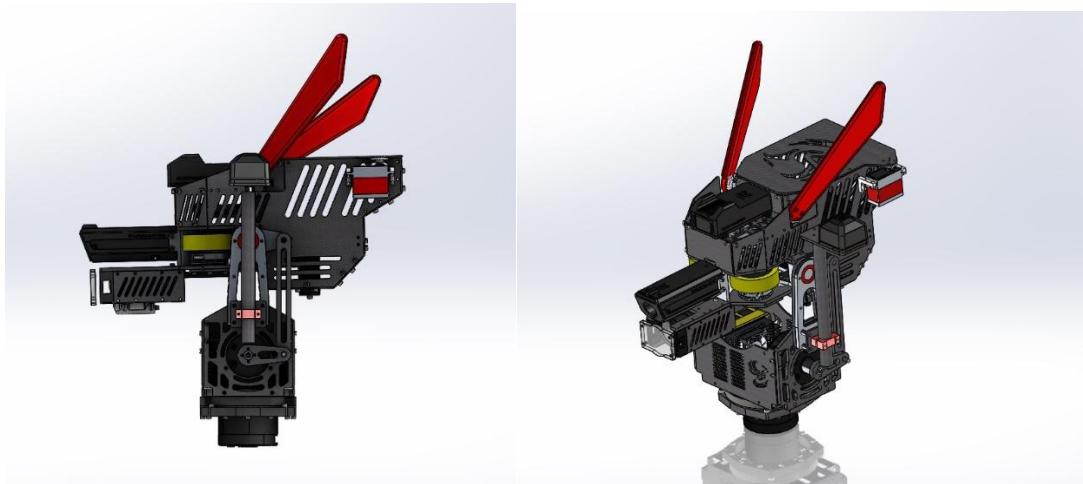
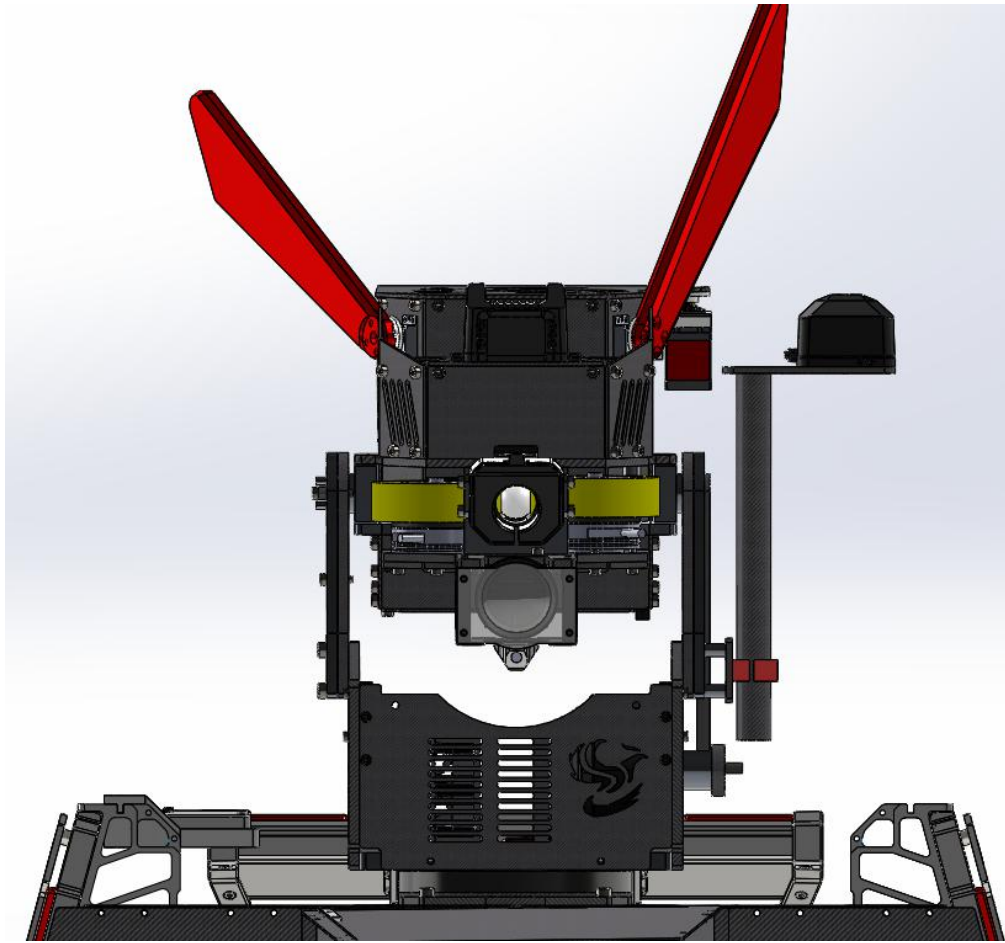
在保证稳定性的前提下缩减尺寸，底盘尺寸；整车采用碳纤维板材与大面积镂空铝材，极大地减轻了重量。

3.1.2 底盘



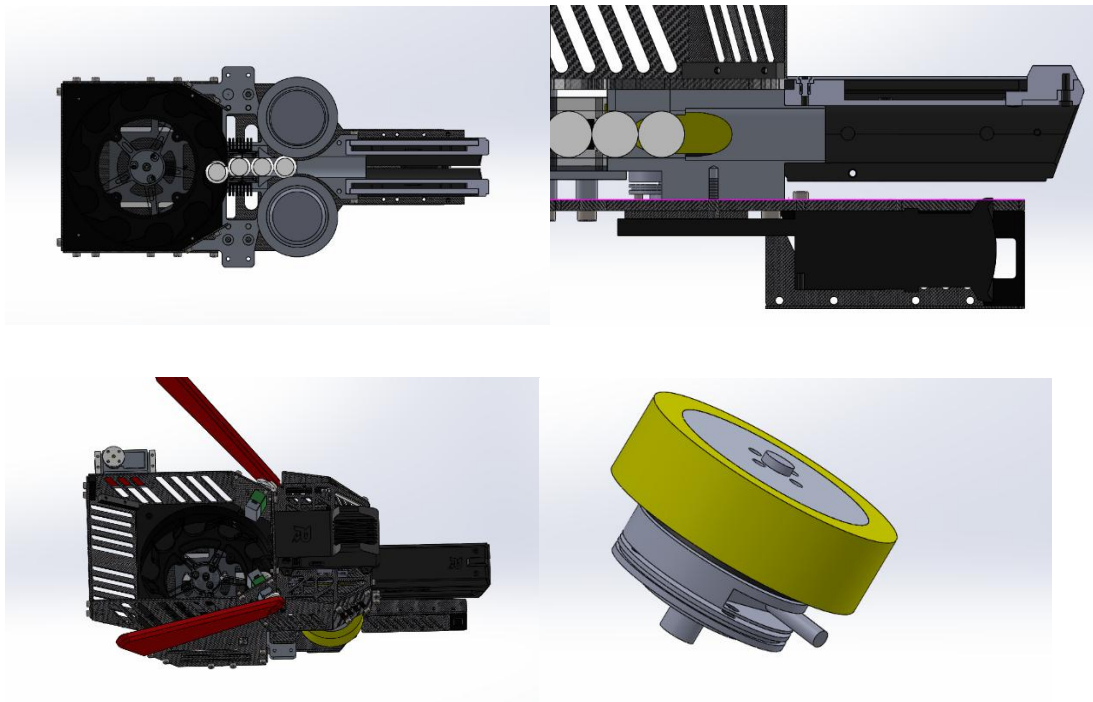
底盘采用两根碳管和大面积镂空碳板为主体，两根中空铝方管在中间辅助支撑，保证结构强度的同时最大限度减轻重量。

3.1.3 云台



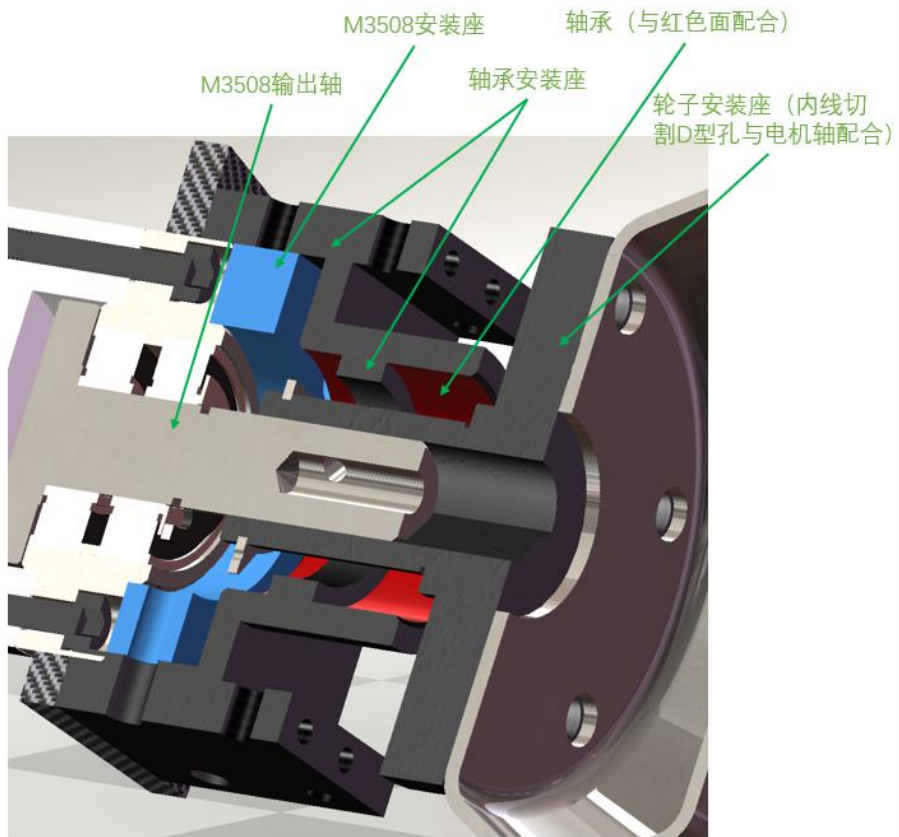
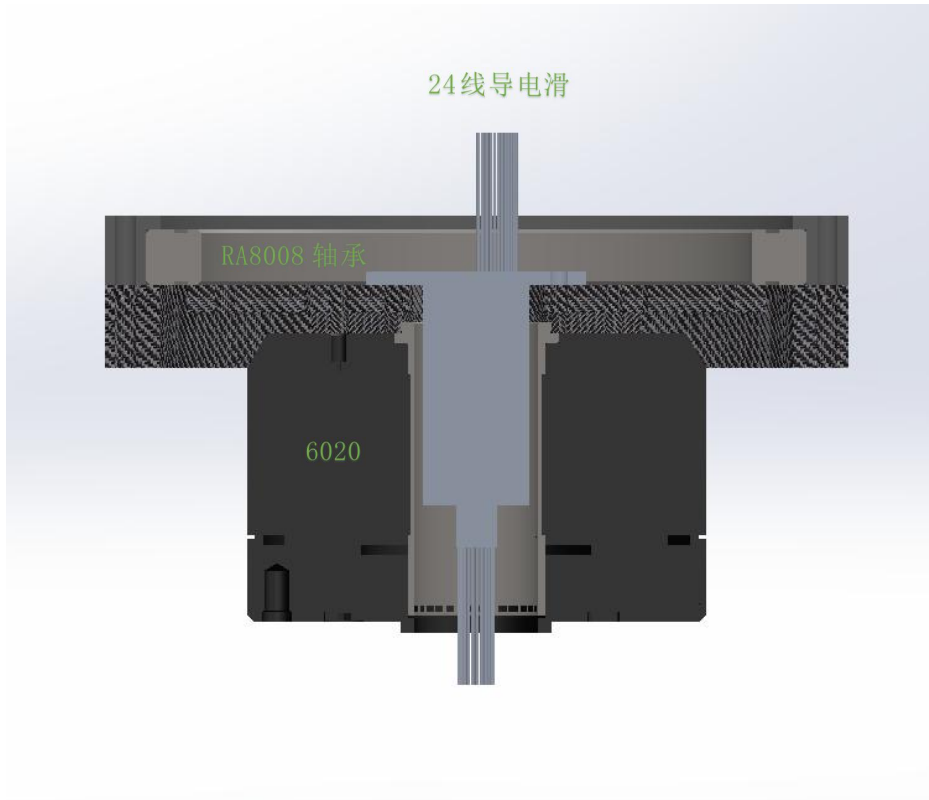
360° 云台，支持小陀螺，采用 2A、24 线小滑环，将滑环安装在 6020 内部，降低云台整体高度。云台 Yaw 轴和 Pitch 轴电机均为 GM6020 电机，降低整车的控制难度；改变了云台架和 Yaw 轴电机的连接方式，增加结构强度，可以抵抗飞坡与撞击时的冲击，防止“断头”发生。

3.1.4 发射机构

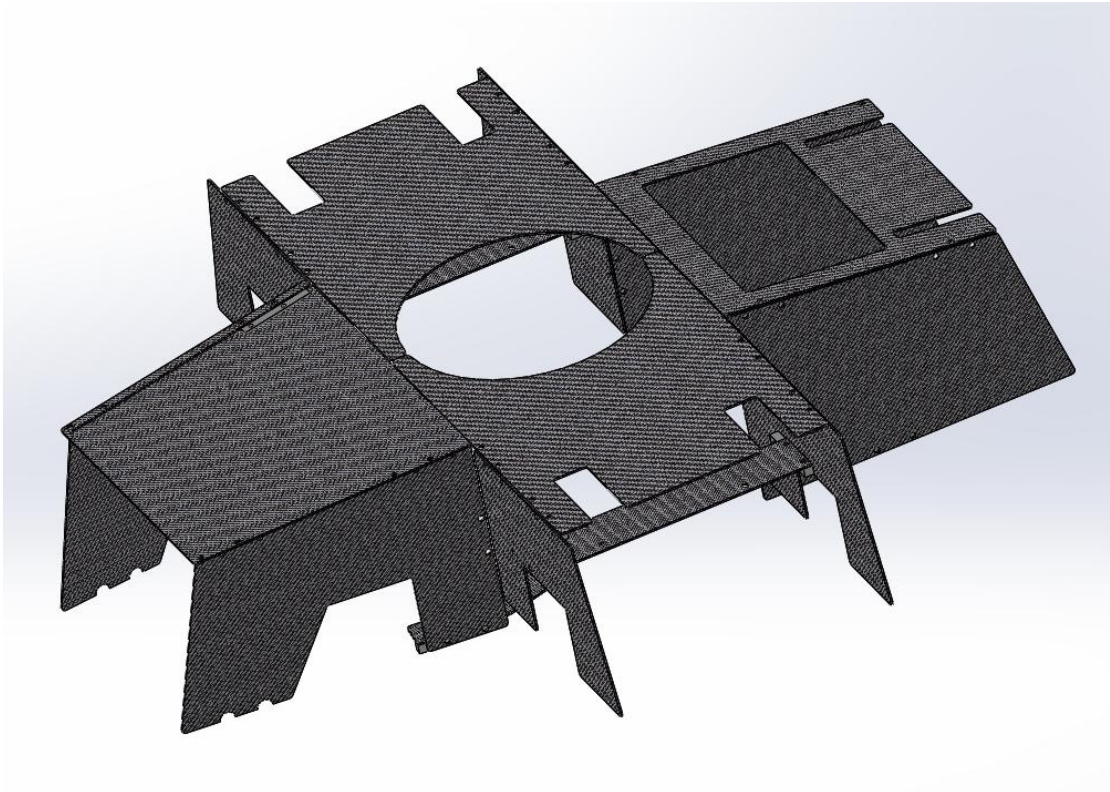


发射机构采用无枪管设计，动力部分使用去除减速箱的 3508 电机作为摩擦轮电机。

3.1.5 Yaw 轴和轮系剖视图



3.1.6 外壳



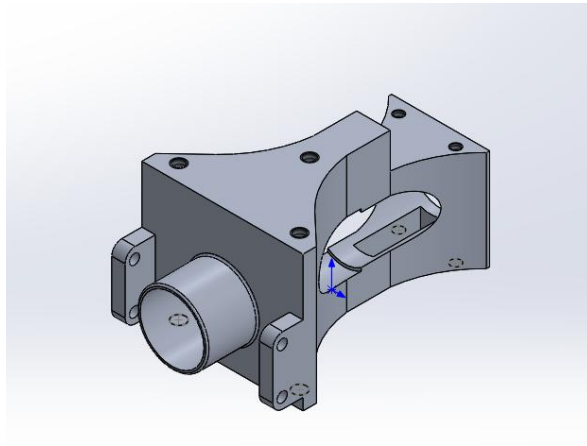
步兵机器人的外壳采用 1mm 碳纤维板，在保证较高强度的同时尽可能地减轻了外壳的重量。对机器人的核心部分，比如机身内的超级电容器、裁判系统、及电源管理系统，采取全包围的外壳，保证弹丸在任何角度射击机器人时，均不会击中机身内部的线路及设备。在保护机器人的同时，保证了机器人整体的美观。

3.2 工艺选择

由于整车大部分采用碳板和铝合金加工件，所以主要工艺为 2D 雕刻以及车&铣。

下面以发射机构中的发射器为例：

发射器三维模型（81*48*40.5）



需求分析：

发射机构是机器人的重要组成部分，在实际使用中，发射精度是机器人性能的重要参数，需要重点保证的参数有：底部定位安装孔的几何精度及相对位置精度、中心通孔的表面粗糙度与同心度等。

材料与加工方法：

我们的第一版发射器通过 3D 打印光固化制造，由于 3D 打印过程中会出现边缘缺失和变形而引起内径微量变形而使得几何精度达不到要求，有时需要重复打印多次以后才得到可以使用的零件。在使用中也发现，由于光固化材料耐热性能并不是很好，发射器零件靠近荧光充能装置的一段会因为长时间受热而产生变形，影响精度。将 3D 打印零件换为铝合金，可以提高零件的强度和耐用度，延长使用的时间；同时还可以更好的平衡发射机构的重心位置。所以将该零件的加工方法改为普通机加工。

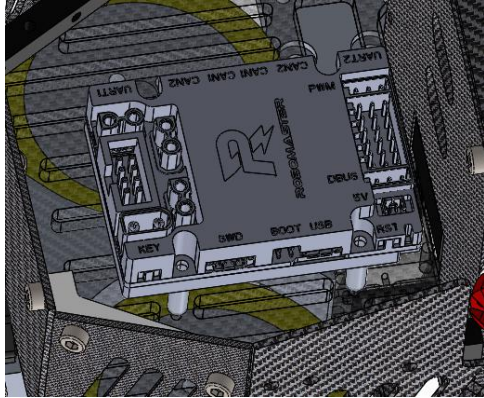
成本与可加工性分析：

该零件通过普通机加工方式制造，在一周左右工期内报价约为 400—500 元，成本在预算范围内，所有加工工步均可通过常规机加工方式加工，具备可加工性。

3.3 安装及连接

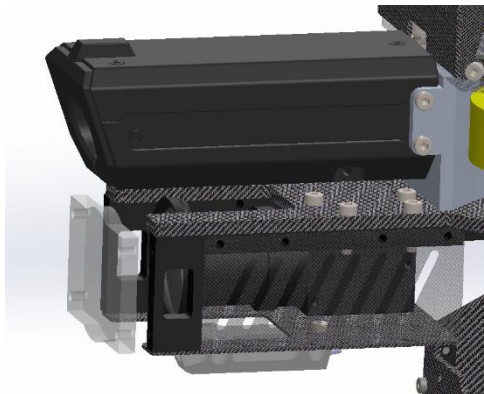
整车大部分安装采用螺丝螺纹或螺丝铝柱的连接方式。

C 板安装示意图



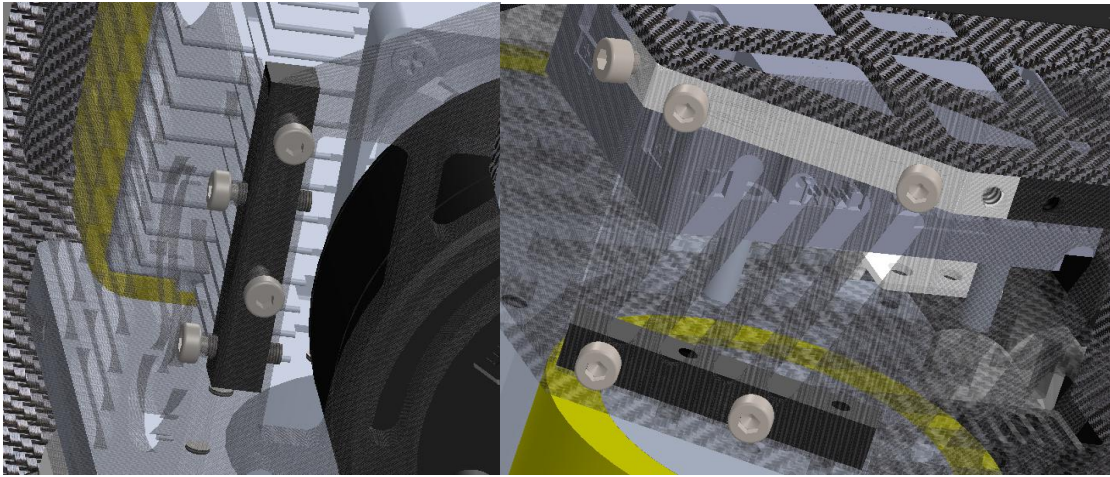
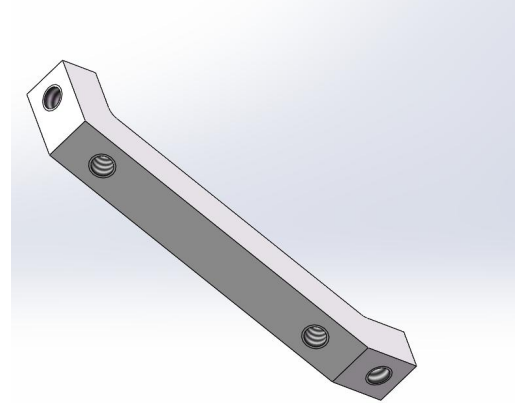
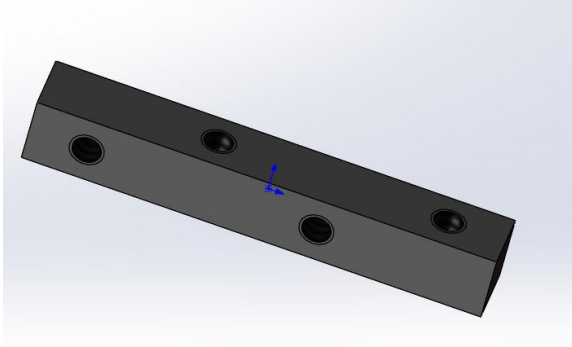
如图所示，C 板和发射机构主体通过铝柱和、螺丝固定。

测速模块、相机、红点安装示范



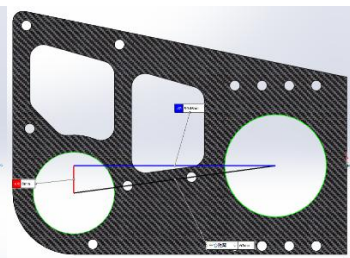
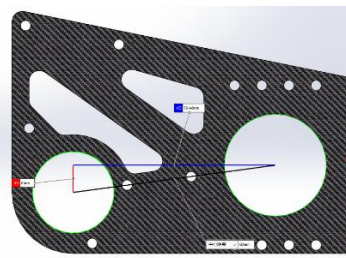
测速模块、相机均通过螺纹和螺丝与主体相连。红点瞄准器与主体通过螺丝和螺母相连。

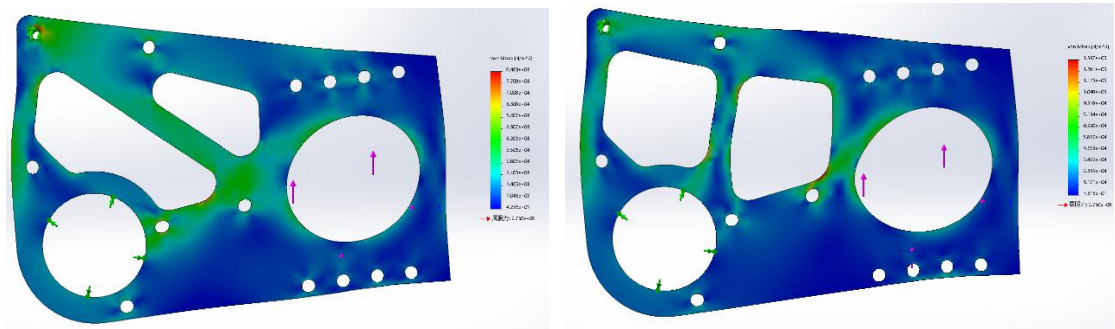
我们的机器人上还大量使用了两种自制的直角连接件，这种连接件可以在所有兵种间通用，十分方便。



3.4 分析

这里以机器人悬挂力臂所用板材分析为例

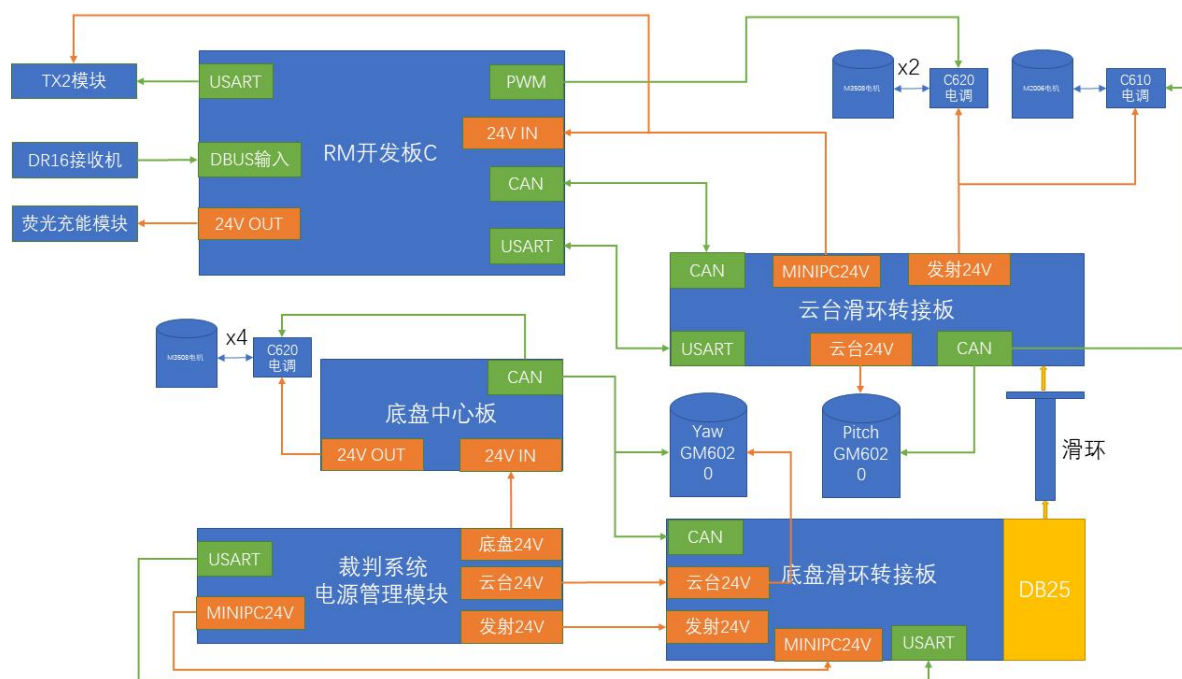




使用 solidworks 的静应力分析,几乎相同的设计参数与载荷下,应力由 1.397×10^5 Pa 下降到 8.407×10^4 Pa, 提升了结构可靠性, 降低了损坏风险。

4. 机器人电路设计

整车接线拓扑如下：



其中，滑环使用森瑞普 24 线 C 反法兰滑环，底盘及云台滑环转接板为自行设计，24V 电源线使用 XT30 硅胶线，USART 及 CAN 使用 GH1.25 硅胶线。

5. 机器人嵌入式控制

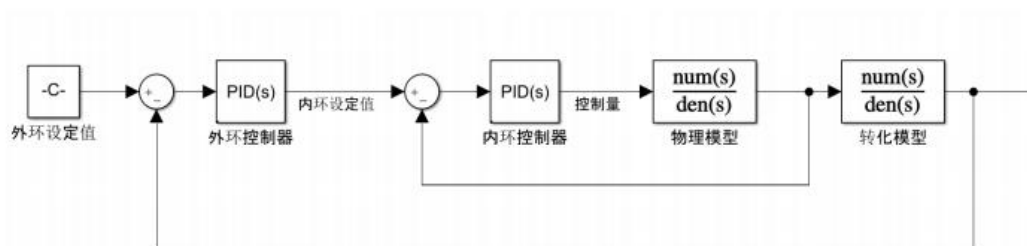
5.1 嵌入式程序功能介绍

1. 底盘 ID 重置功能：向底盘 C620 电调发送指令，快速重设底盘 M3508 电机 ID。
2. 底盘控制功能：完成底盘的麦轮运动控制、底盘功率控制，提供 3 种控制模式：跟随云台角度闭环控制、底盘旋转无角度闭环控制、陀螺运动模式。根据裁判系统功率信息，限制底盘电机电流，避免超功率。
3. 离线判断功能：根据数据反馈的时间戳来判断设备是否离线。
4. 云台控制功能：完成云台的角度控制。提供 2 种控制模式，陀螺仪角度控制、电机码盘角度控制。
5. 姿态解算功能：完成陀螺仪加速度计的角度融合，利用 Mahony 互补滤波算法，解算欧拉角。
6. LED 的 RGB 切换：使用三色 LED 完成 RGB 呼吸灯效。用于判断程序是否死机。
7. 裁判系统数据解析：使用单字节解析裁判系统数据，适用于 2021 年裁判系统。
8. 遥控器数据解析：使用串口空闲中断函数，解析接收机发送的数据。
9. 舵机控制：输出 PWM 舵机信号，通过按键进行控制，控制弹仓开合以及装饰耳朵运动。
10. 射击控制：控制上供弹装置，完成发射逻辑。
11. UI 界面交互：绘制动态及静态 UI，显示辅助瞄准标尺、自瞄状态及超级电容电量。

5.2 嵌入式算法说明

机器人云台控制使用串级 PID 算法。两个控制环节分为外环控制环节和内环控制，角度属于外环控制环节，角速度属于内环控制环节。将外环的输出与内环的输入相连，外环角度环的输入是控制目标，外环角度环的输出是设定的角速

度，为内环角速度环的输入。控制回路设计如下图所示。内环反馈为陀螺仪数据，外环反馈为姿态解算得到的欧拉角。



云台姿态解算使用 Mahony 互补滤波算法。由于磁力计易受场地干扰，Yaw 轴姿态解算没有使用 IST8310 数据，直接使用陀螺仪校准后数据积分获得。将加速度计和陀螺仪共六轴数据，融合解算出载体四元数，再将四元数转化成欧拉角，作为云台外环控制回路反馈。此外，使用 PID 控制算法对 IMU 进行温度控制，有效降低了温度零漂对陀螺仪数据的影响。

5.3 代码设计介绍

使用 CubeMX 生成 Keil MDK 工程，通过 CubeMX 进行 freeRTOS 的配置。共创建 8 项任务，其中 LED 闪烁任务优先级最低，用于判断系统是否存在阻塞，遥控器数据解析优先级最高，保证不出现失控的情况。检测任务根据各模块返回数据情况，判断是否有模块离线，控制蜂鸣器发出不同类型声音，便于定位问题。姿态解算任务由 BMI088 数据就绪中断唤醒，保证姿态解算的实时性。

程序整体可靠性较高，极少出现“疯车”的情况。实现了硬件层和应用层解耦，可读性强，任务模块化程度高。

6. 机器人算法

6.1 算法说明

6.1.1 自瞄

自瞄使用传统算法实现，整体思路如下：

1. 根据启动参数对指定色彩通道进行二值化；
2. 对二值化图像做闭运算排除噪点后进行轮廓提取；
3. 依次按长宽比、大小、倾斜度等条件排除轮廓；
4. 将剩下的轮廓进行两两组合，根据组合后的长宽比、大小、平行度等再次排除；
5. 将距离图像中心最近的装甲板作为目标发送。

通过画 ROI 进一步提升速度：

1. 获取到目标装甲板后，将装甲板附近区域作为 ROI，下一帧图像仅计算 ROI 范围；
2. 若一定时间内 ROI 区域内未找到装甲板则放大 ROI（排除装甲板被击打闪烁）；
3. 若放大后仍未找到装甲板则认为跟丢，进行全图搜索。

使用如上算法，我们在保证装甲识别率的情况下能够达到 220fps 的帧率，极大地提高了对敌效果。

6.1.2 提前量

因今年规则大幅提高弹速限制，机器人的相对运动与重力对弹道造成的影响不容忽视，我们设计了一套提前量+重力补偿算法用于被限制弹速的机器人（步兵和英雄），为避免增加系统复杂度，哨兵今年并未实装本系统。

该算法主要由下列几部分组成：

1. 测距：采用相似三角形原理进行测距。在镜头对准目标装甲板时，可近似认为装甲板与镜头光轴垂直，此时装甲板灯条长度与镜头距灯条距离成线性关系，利用此关系可近似得出到目标装甲板距离，相较于 PnP 算法较为节省算力；
2. 运动解算：在自瞄算法找到目标装甲板后，将装甲板位置换算到球坐标系，将其与上一帧结果做差分并叠加自身运动速度后近似得到目标装甲板相对运动速度；
3. 预测：将相对运动速度代入弹道（通过大量数据测得，形如 $x=f(t, pitch)$, $y=g(t, pitch)$ ），求解得到弹丸飞行速度 t 与目标 $pitch$ 角，再将飞行速度带入相对运动速度得到目标 yaw 角，即完成了提前量与重力补偿的计算。

6.2 MiniPC 与单片机的通信方式

MiniPC 通过串口与单片机通信，定义了串口通信协议如下：

意义	适用范围	发送频率	方向
雷达数据包透传	所有机器人	收到转发	单片机->TX2
自瞄状态	所有机器人	改变时发送	单片机->TX2
机器人位姿信息	所有机器人	10Hz	单片机->TX2
自瞄锁定位置	所有机器人	计算完成发送	TX2->单片机
提前量计算结果	所有机器人	计算完成发送	TX2->单片机

帧头	整个数据包长度	命令字	参数
0xaa00	uint8, 高位在前	0x01	原始数据包
0xaa00	uint8, 高位在前	0x02	uint8, 自瞄状态字
0xaa00	uint8, 高位在前	0x03	float32, float32, float32, float32,

			float32
0xaa00	uint8, 高位在前	0x81	float32, float32, float32
0xaa00	uint8, 高位在前	0x82	float32, float32

校验位	帧尾	备注
uint16, 校验位前所有字节相加	0x11bb	无
uint16, 校验位前所有字节相加	0x11bb	见附表自瞄状态字含义
uint16, 校验位前所有字节相加	0x11bb	分别为 yaw、pitch、纵向移动速度、横向移动速度、角速度
uint16, 校验位前所有字节相加	0x11bb	参数为目标在图像中的位置 (x, y) 减去图像中心坐标 (x, y) 的结果, 最后一个参数为距离
uint16, 校验位前所有字节相加	0x11bb	分别为 yaw 轴和提前量(与当前朝向的差)和 pitch 轴角度

7. 人机交互性设计

7.1 自定义 UI 界面

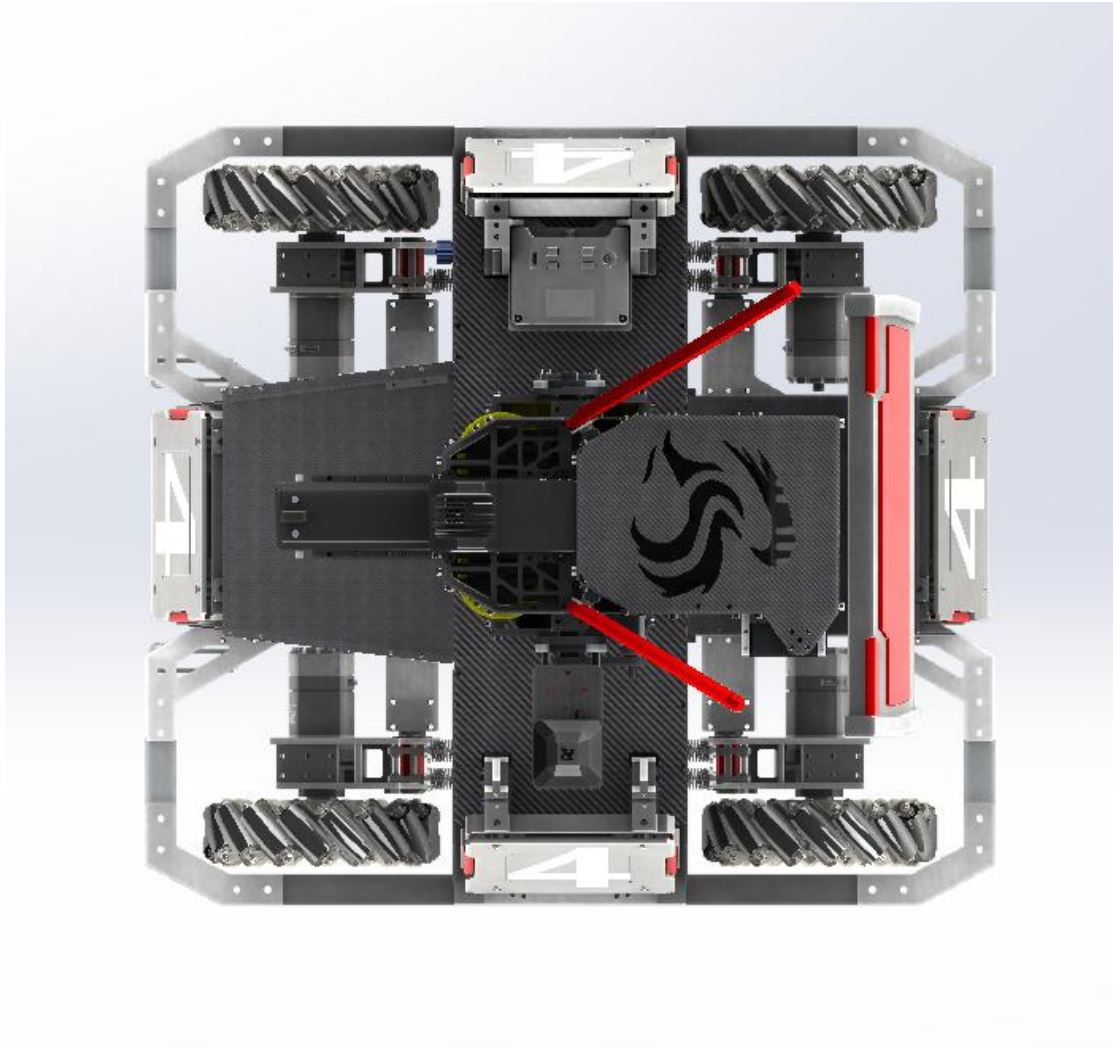
自定义 UI 界面设计与展示



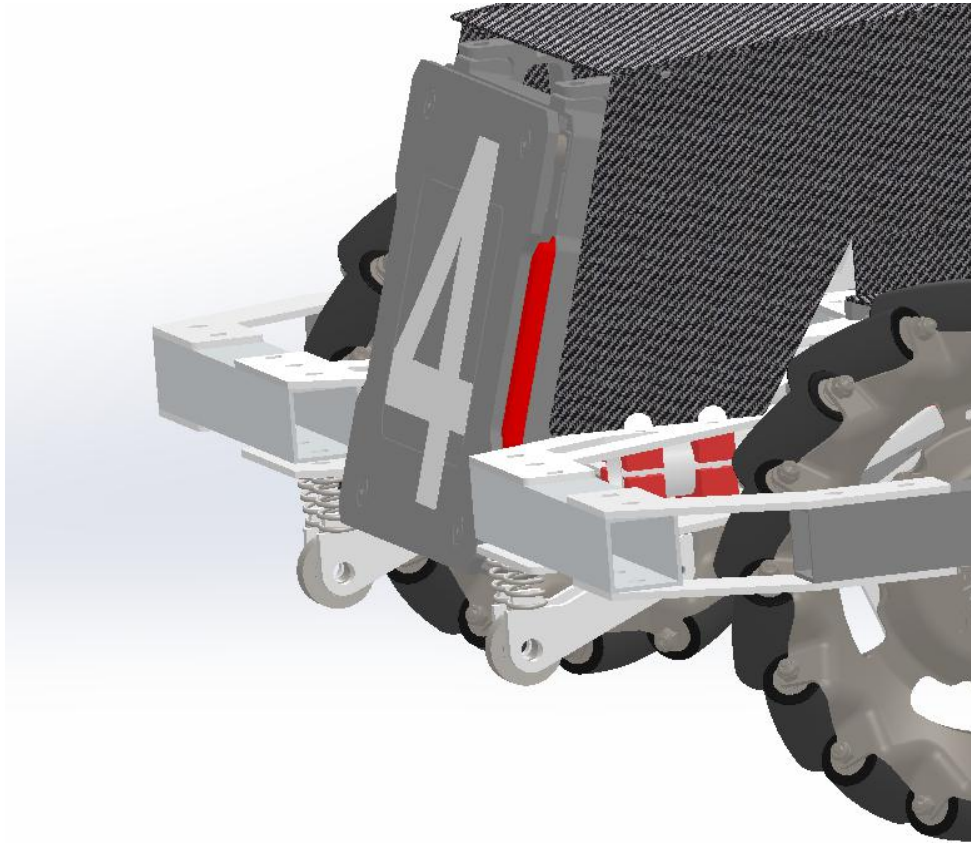
- 1、界面中央为手瞄辅助标尺，分别对应 5m、4m、3m、2m 时的瞄准点；
- 2、右侧 SELFAIM 为自瞄状态指示，分为打大符模式、反小陀螺模式和普通自瞄模式；
- 3、右侧 CAP_VOLTAGE 为超级电容电压状态指示，当电容为满电状态（80%-100%）时显示黄绿色字，电容电量为 50%-80%时显示橙色字，当电容电量 < 50% 时显示紫色字；
- 4、画面最下面为距离判断标尺，类似于倒车影像，帮助操作手判断距离，减少冲撞。

7.2 防误操作设计

车体防止操作手误操作导致的结构破坏的设计



车体底盘四周为全向保护保护框，可以承受两辆步兵以 4m/s 的速度对撞，可以防止操作手突然加速或误触导致的碰撞对车体的损坏。



前装甲板下方加装防卡导轮，可以避免比赛过程中因操作手不熟悉地形导致的误下台阶翻车事故的发生。同时也可以在空中落地时保护车架以及前装甲板减少冲击。

7.3 自动化的优化

步兵机器人的云台控制采用了基于陀螺仪数据的方式，这就使得枪管及图传发射端与自瞄摄像头具有水平稳定及垂直稳定的双稳效果。使步兵机器人在启动、转弯、急停等各种运动状况或在上坡、下坡、飞坡等各种地形行驶时都能保持枪管的指向、减少画面的抖动，从而大大缓解操作手在 pc 端进行操作时的眩晕感和疲劳感，也增强了自瞄系统识别和跟踪的稳定性。从而大大提高了机器人在比赛中对抗的灵活性和快速反应能力。

8. 调试

8.1 调试过程说明

开发工具及调试软件：STM32CubeMX、Keil

8.2 测试

8.2.1

在赛季最初我们设计新步兵时，Pitch 轴采用了同步带传动的方式。在实际的调试实验过程中我们发现同步带的张紧很难控制，甚至出现过因为同步带太紧导致 Pitch 轴电机堵转的问题。后来我们改用双摇杆机构来进行传动，解决了上述问题。



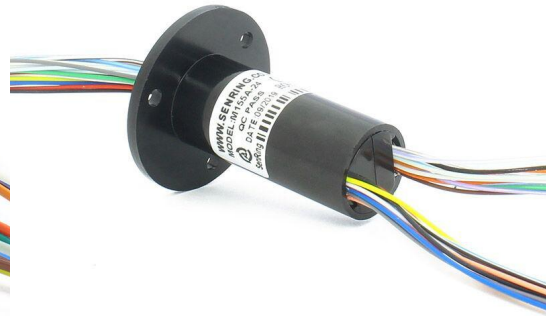
8.2.2

由于最初使用的滑环很大，导致整个机器人的中心非常高，为了降低云台高度，我们换用了外径只有 15.5，可以放进 6020 内部的 24 线小滑环，但小滑环每根线最大只能过 2A 的电流，无法满足要求，后来我们采取用几根线并联共同过大电流的方法，最终降低了云台高度。

森瑞普

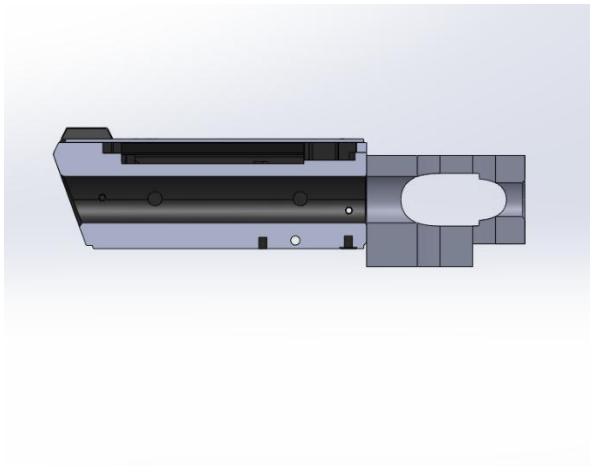
外径30mm
12路10A

森瑞普



8.2.3

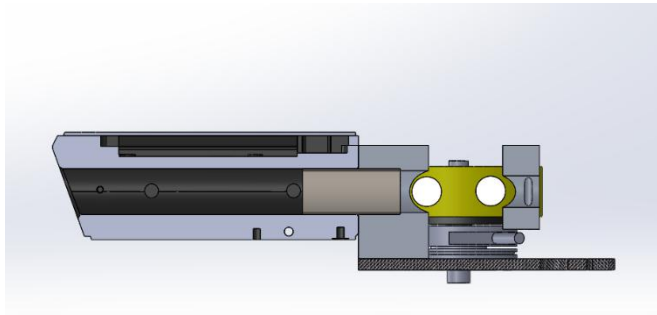
在步兵机器人调试上面我们花的时间最多的就是弹道的优化了。
本赛季初我们决定改变原有的发射机构，采用一种无枪管的设计。



最初的设计为将测速模块上的 LED 灯条固定螺丝取下，然后直接通过螺丝固定在发射器上。

在实际测试的过程中我们发现这种连接方式并不理想，打出去的子弹会乱飞，命中率不足 50%。后来查阅开源资料[1]以及官方机器人制作规范[2]后，分析得出，主要原因是因为测速模块与发射器间安装时定位精度不够，导致弹丸飞出时擦到测速模块内壁，影响弹道。

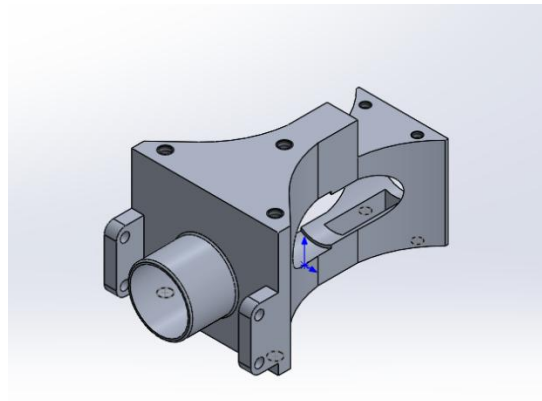
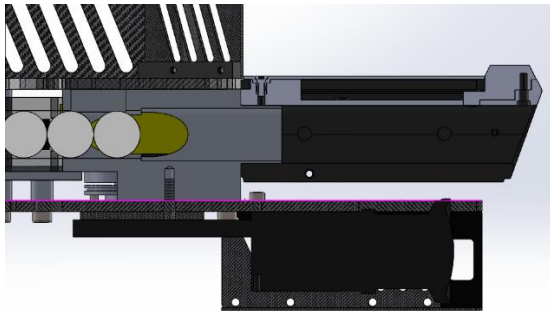
由于我们开始时使用的发射器为 3D 打印零件，所以改进时决定继续使用 3D 打印发射器作为主体，在发射器与测速模块之间加一小截铝管辅助定位。



这一次测试时我们发现效果已经比最开始好了很多，命中率有了明显的提升。但是当我们在另外一辆步兵上面做测试时却发现命中率再一次变得低了起来。对比得知可能是因为 3D

打印的精度不能够完全保证一致所导致的。而且手动将定位铝管塞进发射器时的精度也不能够保证。

除此之外，随着使用时间的加长，3D 打印件靠近荧光充能装置的一侧已经开始发黄，所以我们决定将发射器改为机加工件，同时将定位铝管集成到发射器上。



最终，在测试过程中静止状态下对 5m 静止小装甲目标命中率 98%以上，小陀螺状态下射击 5m 静止小装甲目标命中率可达 95%。

9. 创新设计

步兵机器人采用模块化的设计思路，其中云台 Pitch 轴传动部分、悬挂部分、轮组部分均整合成各个模块，当机器人出现故障时，只需更换相应的模块即可，无需整车拆装，大大提高机器人的维修和检查速度。同时所有的装甲模块均可从外壳外部拆卸，连接外壳所有螺丝也均可从外部拆卸，为维修机器人内部电路提供便利。

10. 参考文献

[1] RM2020-上海交通大学-交龙战队-步兵机器人机械技术开源【RoboMaster 论坛-科技宅天堂】

[2] RoboMaster 2021 机甲大师高校系列赛比赛规范文件

11. 附录

步兵机器人图纸展示

